

吹填软土的工程特性研究

①
79-83

文海家 严春风 汪东云

(重庆建筑大学建工学院 400045)

TU447

摘要 基于大量的实验及工程实测资料,在简单回顾软土工程性质研究的基础上,对吹填软土的一般工程性质进行了有关分析归纳,并对天然软土和吹填软土的主要物理力学性质差异作了对比分析,指出后者虽然工程性质上比前者更为不利,但加固处理的条件却优于前者。

关键词 软土;天然软土;吹填软土;工程性质

中图法分类号 TU447

由于城镇,特别如沿海城镇、港口建设的迅速发展,土地资源显得越来越缺乏与珍贵,人工填(海)筑地基与吹(冲)填(Hydraulic Fill)造陆技术为解决这一问题提供了新的思路与途径,并在近二、三十年来迅速得以推广应用。

吹填造陆技术的出现源于港口建设工程。早期港口建设中,习惯上,大量的航道及港池淤泥需用抛泥船将其抛至外海,而港口后方陆域的形成,多用开山石和海运砂等大量的工程填料来人工填海。这种做法,一方面抛泥地越来越少且越来越远致使抛泥费用越来越大,同时也引起近海环境污染问题日益严重;另一方面开山石日益紧张与海运砂料受资源和运输的影响等,也使得人工填海造陆的价格不断上涨;随着港口建设进程的加速,这些问题显得更为突出。近半个世纪以来,出现了利用需大量清除的航道、港池淤泥作为港口后方陆域形成的(水力)吹填工程用料这一综合利用资源较为理想的新技术,其工程应用很快得以推广。至今,吹填造陆技术已广泛应用于沿海及内陆近河、湖地区各种堆场、堤坝、建筑场地地基等土建工程中。

显然,由人工吹填而成的各种工程地基是一种典型的软弱土地基(Soft-Soil Foundation),故随着吹填造陆技术的广泛应用,对这种人工吹填软土地基的加固处理(Ground Treatment)也已成为不可避免的技术课题。我们知道,更好地把握软土的工程性质,是有效地处理加固软土地基的关键。人工水力吹填土从其物质组成到工程性质都有别于原状天然软弱土,而以前大多将其与天然软土混在一起来讨论它的工程性质,专门的研究文献至今几乎为零!本文试图以收集的大量实验及工程实测资料为依据,对吹填软土(Dredger Fill)的某些工程特性进行有关专门探讨。

1 软土工程特性研究的简单回顾

天然软土(Natural Soft-soil)的物质组成、孔隙水、微观结构及其在工程上所表现的物理力学性质一直都是岩土工程领域的重点研究对象,至今这方面的理论已发展较为成熟。

天然软土在我国分布十分广泛,沿海、内陆湖泊附近和河流中下游地区,地表下第四纪松软覆盖层深厚。如天津、大连、温州、宁波等地的滨海相沉积软土;广州、上海等地的三角洲相沉积软土;闽江、鸭绿江口平原的潮谷相沉积软土等。天然软土因地区分布不同或同一地区而土层不同其工程性质(Engineering Properties)有所差异。魏汝龙对我国沿海各地区软土的工程特性进行了长期的研究,认为我国沿海大部分地区软土的成因基本上相似(湛江地区的淤泥质粘土除外),并可将其分成

收稿日期:1999-03-01

文海家,男,1971年生,硕士

淤泥、淤泥质粘土、淤泥质亚粘土、淤泥混砂四类,其工程特性参见表 1^[1]。

表 1 我国沿海地区软土的典型类型及工程特性

类型	天然含水量 $w(\%)$	密度 γ (kN/m^3)	孔隙比 e	界限含水量 $ \%$		塑性 指 数 I_p	压缩指 数 a_{v-1} ($1/\text{MPa}$)	不排水 强度 $C_u(\text{kPa})$	渗透系 数 $K, 10^{-7}$ (cm/s)	颗粒组成 $(\%)$		
				W_L	W_p					砂	粉	粘
1	60~90	15~16	>1.5	50~55	25~30	25~30	1.5~2.3	5~10	~0.1	~10	~40	~50
2	45~50	17~17.5	~1.3	40~45	20~25	~20	~1.0	10~30	~1.0	~5	~55	~40
3	35~40	18~18.5	~1.05	~34	~20	~14	~0.7	-	~10.0	~5	~60	~35
4	35~40	18~18.5	1~1.15	~34	~20	~14	-	-	-	~50	~15	~35

*1-淤泥 2-淤泥质粘土 3-淤泥质亚粘土 4-淤泥混砂

赵维炳等对我国部分地区各种成因软土的工程特性作了统计^[2],如表 2 示。

表 2 我国部分地区软土物理力学性质指标

地区	土层埋 深(m) 或土质	含水量 $w(\%)$	重 度 γ kN/m^3	孔隙比 e	饱和度 $S_r(\%)$	液 限 W_L ($\%$)	塑 限 w_p ($\%$)	塑 性 指 数 I_p	渗透系 数 $K, 10^{-1}$ (cm/s)	压缩系 数 a_v MPa^{-1}	粘聚力 c kPa	内摩擦 角 φ ($^\circ$)
天津	7~14	34	18.2	0.97	95	34	19	17	1.0	0.51	3~14	2~7
塘沽	8~17	47	17.7	1.31	99	42	20	22	2.0	0.97	17	4
	17~24	39	18.1	1.07	96	34	19	15	2.0	0.65	17	4
上海	1.5~6	37	17.9	1.05	97	34	21	13	20.0	0.72	6	18
	6~7	50	17.2	1.37	98	43	23	20	6.0	1.24	5	15
南京	软粘土	40~50	17.2~18.0	0.93~1.52	98~100	35~44	18~24	17~20	-	0.5~0.8	2~18	4~10
杭州	3~9	47	17.3	1.34	97	41	22	19	-	1.30	6	14
	9~19	35	18.4	1.02	99	33	18	15	-	1.17	6	14
宁波	2~12	50	17.0	1.42	97	39	22	17	0.3	0.95	10	1
	12~28	38	18.6	1.08	94	36	21	15	0.7	0.72	-	1
舟山	2~14	45	17.5	1.32	99	37	19	18	70.0	1.10	-	-
	17~32	36	18.0	1.03	97	34	20	14	3.0	0.65	-	-
温州	1~35	63	16.2	1.79	99	53	23	30	-	1.93	5	12
福州	3~19	68	15.0	1.87	98	54	25	29	0.8	2.03	1~15	10~15
	19~25.1~3	42	17.1	1.17	95	41	20	21	5.0	0.70	-	-
广州	0.5~10	73	16.0	1.82	99	46	27	19	30.0	1.18	-	-
贵州	软粘土	53~93	15.8~17.6	1.42~2.38	99~100	56~70	26~34	26~38	-	0.6~2.6	6~63	3~21
昆明	软粘土	42~68	16.2~18.5	1.56~0.95	-	34~60	22~42	12~18	-	0.4~0.9	15~22	12~17

由以上资料,我们可以归纳出一般天然软土的主要工程特性如下:

- A. 颜色以深色为主,粒度成分以细颗粒为主,有机质含量较高;
- B. 塑性指数大,一般在 10 以上;
- C. 天然含水量和孔隙比大,重度小,天然含水量在 30% 以上,高可超过 100%,孔隙比大于 1.0,天然重度 $\gamma = 15 \sim 19 \text{ kN/m}^3$;
- D. 强度低,承载力小,且灵敏度很高;
- E. 高压缩性,压缩系数 $a_v > 0.5 \text{ MPa}^{-1}$,基础沉降量大;
- F. 渗透性很小,一般渗透系数在 10^{-7} 和 10^{-8} cm/s 数量级,沉降速度慢,固结完成需很长时间;
- G. 往往具有较显著的流变特性,片架结构软粘土更是如此。

2 吹填土的一般工程特性分析

吹填 (Hydraulic Fill) 施工刚完成时, 吹填软土 (Dredger Fill) 一般极为松散, 且含水量极高, 致使整个场地处于泥浆状态; 这种情况如果不进行人工加固处理, 吹填软土的物理力学性质也会随着时间流逝而自然产生极为缓慢的变化, 其出露水面的表部经晾晒脱水将会形成一厚 0.1~0.3 m 的龟裂状硬壳层, 该层与其下部的吹填淤泥 (Hydraulic Fill Gytja) 在物理力学性质上反应出明显的区别。由于存在的实际困难, 吹填施工刚完成时现场吹填软土的物理力学性质指标是难以进行取样实验测定的, 建设部综合勘察研究设计院深圳分院曾为此专门进行了吹填后淤泥性状的模拟实验, 并在淤泥吹填完工 10 个月后进行有关物理力学性质的量测^[3]; 吹填施工完成一定时间以后, 其物理力学性质的实验资料^[3,4,5,6] 较多。这里对以上有关分析成果资料进行了归纳, 一般情况如表 3 所示。

表 3 吹填软土(淤泥)一般工程性质

吹填后时间与类型	E. 指 标																	
	w %	γ kN/m ³	e	f_t	a_{1-2} MPa ⁻¹	E_s MPa	$C_v \cdot 10^{-4}$ cm ² /s	$K \cdot 10^{-6}$ cm/s	C_u kPa	C (kPa)				颗粒组成 (%)				
										uu	cu	uu	cu	粉粒	粘粒	有机质		
模拟刚吹淤*	120.2	14.25	3.219	-	4.3	-	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
约 10 月淤泥*	104.6	14.1	2.824	17.3	1.915	2.084	5.19	1.99	3.1	11	11	1.7	8.6	40~45	25~35	~4.0		
9 月硬壳层**	63.2	16.3	1.736	19.9	1.438	2.538	12.33	1.897	-	-	-	-	-					
>5 年淤泥***	57.0	16.8	1.560	24.3	1.330	1.900	-	1~10	10.0	6	6	4	18					

* 据建设部综合勘察院深圳分院武威^[3]、** 据深圳南油集团有限公司杜焯芳等^[4]、*** 据一航局申伯照^[5]

事实上, 吹填淤泥的物质组成及工程性质非常复杂与不均一。一般情况下, 其物质组成随距吹填管口距离的远近存在着显著的差异 (在其粒度成分上尤其明显), 也由此决定了其工程性质上的差异。另外, 由表 3 也可以看出, 其工程特性与吹填后时间的长短关系也较大。下面以其硬壳层及其下伏淤泥层加以说明。

1) 吹填淤泥硬壳层: 一般吹填施工后 3~6 个月内吹填淤泥表部经晾晒蒸发脱水形成, 灰色, 呈龟裂状, 缝宽可达 5~6 cm; 其厚度从管口向外逐渐减小, 由吹填淤泥静态落淤形成, 故粒度较细; 含水量为 63.2%, 明显低于下卧吹填淤泥、饱和、且由地表向下递增; 孔隙比大于 1.5, 欠固结、高压缩性; 但总的说来, 其力学性质优于下伏吹填淤泥。

2) 吹填淤泥层: 于硬壳层以下, 灰色, 非常稀软, 不均一, 高灵敏性, 管口区分布吹填粉砂夹淤泥, 往外逐渐从含砂淤泥过度为吹填淤泥, 粒度变小, 具明显分选特征; 含水量高达 100% 以上, 为超饱和状态, 孔隙比 > 2.5, 欠固结。其工程性质明显差于上覆硬壳层及原状海相淤泥, 天然状态下, 其物理力学性质会发生极为缓慢的变化。

那么, 以吹填淤泥为例, 我们现在也可以归纳出吹填软土一般具有以下工程特性:

- A. 物质组成及工程性质不均一, 且时间因素对其影响较大;
- B. 含水量和孔隙比很大, 重度小, 在吹填施工完成以后较长时间内, 含水量高达 100% 以上, 孔隙比大于 2.5, 天然重度 $\gamma = 14 \sim 15 \text{ kN/m}^3$ 左右;
- C. 塑性指数大, 一般在 15 以上;
- D. 强度很低, 十字板抗剪强度小于 10 kPa, 承载力很小, 且灵敏度很高;
- E. 压缩性很高, 一般压缩系数 $a_v > 2.0 \text{ MPa}^{-1}$, 沉降量很大;
- F. 渗透性小, 一般渗透系数在 10^{-6} cm/s 数量级, 沉降速度慢;
- G. 粘粒含量一般为 25~35%, 有机质含量在 4.0% 左右。

3 吹填土与一般天然软土工程特性的对比分析

为了更好地了解吹填软土的有关工程特性,这里专门列出所收集具代表性的天然与吹填软土的物质成分、结构、颗粒分析及部分物理性质实验测定成果,以供对比分析,如表 4 示。

表 4 天然与人工吹填软土的物质成分、结构及颗粒分析对比

地区与土质	指 标													备注	
	含水量 w %	密度 ρ g/cm^3	孔隙比 e	液限 w_L %	塑限 w_p %	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	颗粒分析成果(%含量)							有机质含量 %
								砂粒(mm)		粉粒(mm)		粘粒(mm)			
								>0.1 0.05	0.1~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.002	<0.002		
深圳南油吹淤	104.6	1.41	2.824	50	32.7	17.3	3.789	-	-	-	-	-	-	-	据 武威
深圳妈湾淤泥	80.0	1.55	2.060	50.2	28.1	26.7	2.895	0.0	9.03	37.2	25.35	28.50			
天津新港淤泥	64.8	1.66	1.782	47.0	22.6	24.4	1.768	2.50	3.60	40.00	18.00	36.00			
连云港淤泥	75.4			58.4	28.8	29.6	1.547	11.00		13.00	20.20	55.80			
塘沽港1-2区淤 泥质粘土亚粘土	33.9~ 43.9	1.77~ 1.85	0.99~ 1.23	38.4~ 44.8	19.5~ 2.34	15.6~ 21.0	1.06~ 1.28	36~44			40~47		5.4~ 7.5	据 申伯熙 陈环等	
塘沽港3-4区吹 填(>5年)淤泥	54.6~ 57.0	1.68~ 1.84	1.00~ 1.56	48.0	2.37	22.0~ 24.3	1.10~ 1.50	40~45			25~35		4.0		
天津大沽淤泥	45~	1.65~	1.0~	-	-	-	-	14~31		38~51		38~48		5.4~	据 钱征
天津大沽吹填淤	50	1.81	1.7	-	-	-	-	24~31		42~51				7.5	

由前两节表 1、3 及这里所列表 4 的大量试验成果资料可以表明,一般说来,天然软土粘粒含量为 40% 以上,高可超过 70%,粉粒含量为 10~40% 不等,而粒径大于 0.05 的砂粒组含量小于 10%;吹填软土粘粒含量则比天然软土要少得多,一般为 25~35%,粉粒组以上粒径颗粒含量则大于 40%。另外,我们还可以对比二者在含水量和孔隙比方面的区别,对于刚完成吹填施工的吹填土,其含水量和孔隙比均远大于天然软土,说明其压缩性和灵敏性比原状海相淤泥(Intact Marine Gytja)更高。此外,从吹填淤泥的形成角度来看,是由海相淤泥经吹填机械松动、扰动、与水混合成泥浆后从管道吹至场区、重新淤积、沉淀的过程,它伴随着原状海相淤泥结构的破坏、颗粒分选以及吹填淤泥新结构的形成,显然,两种结构会存在较大差异;本文作者收集的有关 X-射线衍射及电子显微镜(SEM)分析的天然及吹填软土微观结构成果资料证明了这一点。资料表明,吹填软土的微结构以紊流状和粒状镶嵌结构为主,并发育有大裂隙和微层理以及由粘粒和粉粒及粉砂交叉淤积而成的带状结构^[6],与以粒状胶结和蜂窝状微结构为主的原状海相淤泥相比,表现出更为明显的大孔隙架空结构。众所周知,物质组成及微观结构是控制土的工程性质的最主要的因素,由此也就决定了吹填软土与一般的天然软土在工程性质上的区别。

总之,比较表 1、3,并结合表 4,我们可以得知,吹填软土(淤泥)比天然软土的含水量、重度、孔隙比、压缩系数等要大得多;而另一主要力学性质指标——不排水抗剪强度值前者又比后者小,据陈环教授对天津新港吹填软土有关抗剪强度的研究,认为吹填土在抗剪强度性状方面接近于扰动土^[7];另外,实践表明,自重作用下吹填土获得的固结比天然软土大,也表明吹填软土比天然软土具有更大的欠固结特性与可压缩特性。这些都说明吹填软土最为不利的工程性质;事实也证明,经预压排水固结法(Preloading Method)加固,吹填淤泥的沉降量为原状海相淤泥的一倍以上^[9]。

与此同时,对比表 1 与 3,我们也可以注意到,吹填淤泥的渗透系数远大于天然原状淤泥(接近两个数量级);参照表 4 颗粒分析结果得知,吹填淤泥细颗粒(粘粒)含量比天然软土少得多;另外还有一个事实就是,吹填软土一般高程大于原状海相淤泥,多为出露于水面,位于整个加固土层的上部;等等这些条件表明,前者排水条件明显优于后者,加固时沉降速度也必将较后者大,说明吹填软土虽然其工程性质更差于天然软土,但其加固的物理条件却较好,其加固处理的可行性优于天然软

土,为吹填造陆形成的地基的工程应用提供了保障,这也是吹填造陆技术能得以广泛应用的主要原因之一。

4 结 论

- 1) 吹填软土无论在物质组成还是其工程性质上,与天然软土相比都存在显著的差异;
- 2) 一般说来,在吹填施工完成一定时间内,未进行加固处理的吹填软土的工程物理力学性质明显差于原状天然软土的工程物理力学性质;
- 3) 从处理加固的角度上来看,吹填软土的自然条件及其本质上的物理加固条件优于天然软土,地基土更利于得到有效的加固处理。

参 考 文 献

- 1 魏汝龙. 软粘土的强度和变形. 北京:人民交通出版社,1987
- 2 赵维炳等. 软土固结与流变. 南京:河海大学出版社,1996
- 3 武 威. 在深圳妈湾地区利用淤泥吹填造陆的认识和实践. 建设部综合勘察研究设计院 97 青年科技论文与工程实录,1997:1~6
- 4 杜焯芳等. 超载预压快速加固吹填淤泥. 第五届全国地基处理学术会议论文集,1997:71~78
- 5 申伯照. 塘沽和新港地区工程地质条件特征. 天津软土地基. 天津:天津科学技术出版社,1987:47~55
- 6 钱 征. 天津新港软土的一些工程特性. 天津软土地基. 天津:天津科学技术出版社,1987:33~44
- 7 陈 环. 塘沽新港软粘土抗剪强度的研究. 天津软土地基. 天津:天津科学技术出版社,1987:33~44
- 8 中国土木工程学会土力学及基础工程学会. 土力学及基础工程名词(汉英及英汉对照). 北京:中国建筑工业出版社,1983

Some Engineering Properties of the Dredger Fill

Wen Haijia Yan Chunfeng Wang Dongyun

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jiaozhu University 400045)

Abstract Based on the lots of date come from the experiments and field tests, this paper reviewed the study of engineering properties of the soft - soil; some engineering properties of the dredger fill were analyzed and summed up and compared with the natural soft - soil's. Finally, it pointed out that the dredger fill is inferior to the natural soft - soil about their engineering properties, but its condition of improvement is better.

Key Words soft - soil; natural soft - soil; dredger fill; engineering properties